

Beschreibung

Empfänger für winkelmodulierte optische Signale

- 5 Die Erfindung betrifft einen Empfänger für winkelmodulierte optische Signale nach dem Oberbegriff des Patenanspruches 1.

10 Bisherige optische Übertragungssysteme modulieren die zu übertragende Information auf die Intensität des zur Übertragung benutzen Lichtes auf. In einem Empfangssystem wandelt eine Photodiode die optischen amplitudenmodulierten Signale in elektrische Signale um. In bestimmten Konfigurationen- oder Parameterbereichen eines optischen Übertragungssystems kann es sich als vorteilhaft erweisen, die Information auf 15 die Phase oder der Frequenz des zu übertragenden Lichtes zu modulieren. In diesem Fall ist eine einfache Photodiode nicht mehr ausreichend, um die Information aus den phasen- oder frequenzmodulierten Signalen zu extrahieren.

- 20 Bisher existieren zwei grundsätzliche Konzepte zur eine Phasendetektion optischer Lichtfelder. Beide Konzepte weisen eine Reihe von Vor- und Nachteilen auf und werden in einigen Variationen benutzt.

- 25 Der erste Konzept basiert auf einem Homodynempfang. Das einfallende Lichtfeld des phasenmodulierten optischen Signals wird mit einem zweiten Lichtfeld gleicher Frequenz und mit definierter Phase überlagert (hier wird auf Phasenmodulation aus Klarheitsgründen eingeschränkt). Dieses zweite Lichtfeld 30 kann entweder von einem externen Laser als „Lokaloszillator“ erzeugt werden oder auch ein - um eine Bitdauer - zeitverzögerter Teil des übertragenen Lichtes sein, was unter der Bezeichnung „Selbst-Homodynempfang“ bekannt ist. Die beiden optischen Felder interferieren auf einer Photodiode je nach 35 Phasenlage der Felder konstruktiv oder destruktiv und die Photodiode gibt einen zum Quadrat des Cosinus der relativen Phasenlage der Felder proportionalen Strom aus.

BEST AVAILABLE COPY

Der zweite Konzept basiert auf einem Heterodynempfang. Das einfallende Lichtfeld des phasenmodulierten optischen Signals wird mit einem zweiten Lichtfeld mit verschiedener Frequenz überlagert. Beide optische Felder interferieren auf einer Photodiode. Die Photodiode liefert einen Wechselstrom, dessen Frequenz der Differenzfrequenz der beiden optischen Felder entspricht und dessen Phase durch die Phase des übertragenen optischen Feldes gegeben ist. Ein elektrischer Phasendetektor erzeugt aus diesem Wechselstromsignal einen amplitudenmodulierten Strom.

In beiden Fällen wird als zweites Lichtfeld entweder ein externer Laser oder ein (i. A. um einer Bitdauer) zeitverzögerter Anteil des übertragenen Lichtfeldes benutzt.

Ein externer Laser weist Vorteile bezüglich der Empfängerempfindlichkeit auf, andererseits sind entweder die Anforderungen an die Laserstabilität erheblich („Homodyndetektion“) oder es muss eine weitere elektrische Zwischenstufe eingefügt werden („Heterodyndetektion“).

Überlagerung des empfangenen Lichtfeldes mit einem zeitverzögerten Anteil des gleichen Feldes („Selbst-Homodynempfang“) ist technologisch am einfachsten zu realisieren, allerdings ist die Empfängerempfindlichkeit i. A. um einen Faktor 4 geringer als bei der Detektion mit Hilfe einer externen Lichtquelle.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen einfachen und empfindlichen Empfänger für die Ermittlung der Phaseninformation aus dem übertragenen Licht eines winkelmodulierten optischen Signals anzugeben und weiterhin diese Phaseninformation in ein amplitudenmoduliertes elektrisches Signal umzuwandeln.

Eine Lösung der Aufgabe erfolgt hinsichtlich ihres Vorrichtungsaspekts durch einen Empfänger mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

Der erfindungsgemäße Empfänger weist einen optischen Resonator zur Speicherung des optischen Feldes des winkelmodulierten optischen Signals auf. Als optischer Resonator kann ein aus „Laserspektroskopie, Grundlagen und Techniken, W. Demtröder, Springer, 2000“ bekannter Fabry-Perot-Resonator verwendet werden. Der optische Resonator ist so dimensioniert, dass die Speicherzeit des optischen Feldes etwa eine halbe Bitdauer beträgt. Die Transmissionsfrequenz des optischen Resonators ist auf die Lichtfrequenz abgestimmt. Bei bestimmten Parametern ist die Halbwertsbreite der Transmission im Bereich weniger GHz, so daß die Abstimmung der Resonatorfrequenz nicht allzu kritisch ist.

In einem verlustfreien optischen Fabry-Perot-Resonator, in den Licht mit der Resonanzfrequenz eingekoppelt wird, entsteht ein stark überhöhtes stehendes Lichtfeld. Dieses Lichtfeld dringt durch die teildurchlässigen Spiegel des Resonators nach Außen. An der Seite des Resonators, an dem das Licht aus dem winkelmodulierten optischen Signal eingekoppelt wird, hat das austretende Feld die umgekehrte Phase des eintretenden Feldes, so dass es mit dem eintretenden Feld destruktiv interferiert und kein Licht in den Eingangskanal zurückreflektiert wird. Das aus der Ausgangsseite des Resonators austretende Licht erfährt keine Interferenz durch ein externes weiteres Lichtfeld. Der Resonator erscheint bei einem konstanten Lichtfeld mit der Resonanzfrequenz transparent.

Ändert sich die Phase des einfallenden Lichtfeldes um den Wert π , wird sich aus der destruktiven Interferenz am Resonatoreingang konstruktive Interferenz bilden und daher wird Licht zurückreflektiert. Dafür wird auf „Optical decay from a Fabry-Perot cavity faster than the decay time“, H. Rohde, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, R. Blatt, J. Opt. Soc. Am. B 19, 1425-1429, 2002 hingewiesen.

Der Empfänger eignet sich ebenfalls für ein frequenz- wie ein phasenmoduliertes Signal. Deshalb kann der Empfänger allgemein als Empfänger für ein winkelmoduliertes Signal, d. h. mit der Phase oder mit der Frequenz verwendet werden. Im folgenden wird aus Klarheitsgründen auf einen Empfänger für ein phasenmoduliertes Signal hingewiesen.

Das rückreflektierte Licht wird vom Eingangslicht mittels einer optischen Auskoppereinrichtung wie einem Zirkulator oder einer Kombination aus einem Polarisationsstrahlteiler und einer Wellenplatte getrennt und mittels eines optisch-elektrischen Wandlers wie eine Photodiode detektiert. Der Photodiodenstrom stellt somit ein Maß für die Ermittlung einer Phasenänderung bzw. -wechsel des einfallenden Lichtes dar.

Wesentliche Vorteile des erfindungsgemäßen Empfängers sind darin zu sehen, dass die Empfindlichkeit gegenüber dem Selbst-Homodynempfang um einen Faktor von bis zu 2 gesteigert ist, und dass er dabei nur wenig komplexer als selbiger und deutlich einfacher als Lösungen mit einem zusätzlichen Laser zu realisieren ist.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert.

Dabei zeigen:

Fig. 1: den Verbesserungsfaktor der Signal-Rauschabstände zwischen einem Homodynempfang und dem erfindungsgemäßen Empfänger,

Fig. 2: einen ersten erfindungsgemäßen Empfänger,

Fig. 3: einen zweiten erfindungsgemäßen Empfänger.

In Fig. 1 ist der Wert eines Verbesserungsfaktors α der Signal-Rauschabstände zwischen einem herkömmlichen Homody-nempfänger und dem erfindungsgemäßen Empfänger als Funktion der Signal-Rauschabstände des Eingangslichtes $SNR_{in} = \frac{E_s^2}{E_N^2}$ dar-

5 gestellt. E_s bezeichnet das Signalfeld und E_N das Rauschfeld des Eingangssignals am optischen Resonator.

Zur Klarstellung der Erfindung im Bezug auf dem optischen Resonator werden im folgenden wichtige Resonatorparameter erläutert.

10 Die Eigenschaften einen optischen Fabry-Perot-Resonators, bestehend aus zwei Spiegeln mit der Reflektivität R im Abstand L werden (vereinfacht) durch folgende Parameter bestimmt:

1. Ein freier Spektralbereich FSR gibt den Frequenzabstand
15 der Resonatormoden an.

$$FSR = \frac{c}{2L}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet.

20

2. Eine Halbwertsbreite $\Delta\nu$ der Resonanz ist durch

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} * \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}$$

25 gegeben.

3. Daraus ergibt sich die Finesse F als Quotient aus dem freiem Spektralbereich FSR und der Halbwertsbreite $\Delta\nu$ zu:

30
$$F = \frac{FSR}{\Delta\nu} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \approx \frac{\pi}{1-R} \quad \text{für } R \approx 1.$$

4. Eine Speicherzeit τ eines optischen Fabry-Perot-Resonators als Zeit, nach der nach Abschalten des Eingangsfeldes die

Intensität des im Resonator gespeicherten Feldes um den Faktor $1/e$ abgefallen ist, beträgt:

$$\tau = \frac{F \cdot L}{\pi \cdot c}.$$

5

Mit einer Resonatorlänge von $L=1$ mm und einer Speicherzeit von $\tau = 50$ ps (halbe Bitdauer bei 10 Gbit/s) ergibt sich eine Finesse von $F \approx 50$ und daraus eine Spiegelreflektivität R von ca. 0,94%. Der freie Spektralbereich FSR beträgt 150 GHz und die Halbwertsbreite $\Delta\nu = 3$ GHz.

10

Im Folgenden wird die verbesserte Empfangsempfindlichkeit des erfindungsgemäßen Empfängers gegenüber eines Selbst-Homodynempfangs dargestellt.

15

Das optische Eingangsfeld wird als Summe aus dem Signalfeld E_s und dem Rauschfeld E_N dargestellt: $E_{In} = E_s + E_N$.

Bei einem Selbst-Homodynempfang spaltet ein Strahlteiler das Feld in zwei Teilfelder E_1, E_2 auf:

20

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{In} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_s + E_N)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{In} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_s + E_N)$$

25

Nach Zeitverzögerung eines Feldes um eine Bitdauer werden beide Felder wieder mit einem weiteren Strahlteiler addiert und einer der Ausgänge des Strahlteilers mit einer Photodiode detektiert. Es wird angenommen, dass sich die Phasenlage nicht geändert hat und daher die Zeitverzögerung nicht explizit in die Formel hereingeschrieben werden muss.

30

Das Feld E_{PD} am Ort der Photodiode ist:

$$E_{PD} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} E_2.$$

Daraus ergibt sich die optische Leistung P_{PD} am Ort der Photodiode zu:

$$P_{PD} \propto E_{PD}^2 = E_S^2 + E_N^2 + 2E_S E_N$$

5

Die Signal-Rauschabstände $SNR_{Ho\ mod\ yn}$ des Selbst-Homodynempfangs sind folglich:

$$SNR_{Ho\ mod\ yn} = \frac{E_S^2}{E_N^2 + 2 * E_S E_N}$$

10

Bei dem erfindungsgemäßen Empfänger ist im eingeschwungenen Zustand im Inneren des Resonators die Feldstärke des kohärenten Eingangsfeldes E_S um den Faktor $\frac{F}{\Pi}$ überhöht, während das Rauschfeld nur um den Faktor $1 - R$ abgeschwächt in den Resonator eindringt, da die Überhöhung nicht kohärent erfolgt. Das Feld E_{Res} im Inneren des Resonators ist also:

$$E_{Res} = \frac{F}{\Pi} * E_S + (1 - R) * E_N$$

20

Das Feld E_{Res} im Inneren des Resonators dringt durch die teildurchlässigen Resonatorspiegel mit einer Abschwächung um den Faktor $(1-R)$ nach Aussen. Tritt ein Phasenwechsel des eingestrahlten Feldes auf, so interferiert das aus dem Resonator austretende Licht nicht mehr destruktiv mit dem einfallenden Feld und Licht verlässt den optischen Resonator in Gegenrichtung zum einfallenden Licht.

25

Das sich in Gegenrichtung zum einfallenden Licht ausbreitende Feld $E_{Reflektiert}$ besteht aus dem am Resonatorspiegel reflektierten Anteil des Eingangsfeldes E_{IN} und dem durch den

30

halbdurchlässigen Resonatorspiegel austretenden Anteil des im Resonator gespeicherten Lichtfeldes E_{Res} .

$$E_{Reflektiert} = R * E_{IN} + (1 - R) * E_{Res}$$

$$E_{Reflektiert} = R * (E_S + E_N) + (1 - R) * \left(\frac{F}{\Pi} E_S + (1 - R) * E_N \right)$$

8

Mit $F \approx \frac{\pi}{1} - R$ und $R \cong 1$ und daher $(1 - R) * (1 - R) \cong 0$ ergibt sich:

$$E_{\text{Reflektiert}} = 2 * E_s + E_N.$$

5

Die Leistung P_{PD} an der Photodiode ist:

$$P_{PD} = E_{\text{Reflektiert}}^2 = 4 * E_s^2 + E_N^2 + 4 * E_s E_N.$$

- 10 Die Signal-Rauschabstände SNR_{NEW} des erfindungsgemäßen Empfängers sind folglich:

$$SNR_{\text{NEW}} = \frac{4 * E_s^2}{E_N^2 + 4 * E_s E_N}.$$

- 15 Damit kann der Verbesserungsfaktor α der Signal-Rauschabstände zwischen einem herkömmlichen Homodynempfänger und dem erfindungsgemäßen Empfänger berechnet werden:

$$\frac{SNR_{\text{NEW}}}{SNR_{\text{Homodyn}}} = 4 * \frac{E_N^2 + 2 * E_N E_s}{E_N^2 + 4 * E_N E_s} = \alpha$$

20

Der Wert des Verbesserungsfaktors α hängt vom Signal-Rausch Verhältnis $SNR_{\text{In}} = \frac{E_s^2}{E_N^2}$ des Eingangslichtes ab. Die Figur 1 stellt den Verbesserungsfaktor α in Abhängigkeit vom SNR_{In} dar.

25

- Der Wert für den Verbesserungsfaktor α gilt für den Zeitpunkt des Phasenwechsels, danach nimmt das Signal exponentiell ab. Unter der Annahme, dass die Photodiode und die Auswerteelektronik nicht schnell genug sind, um nur den Spitzenwert zu detektieren, sondern über eine Bitdauer integrieren, muss der Verbesserung gegenüber dem Selbst-Homodynempfang um den Faktor $\frac{1}{2} - \frac{1}{2} * e^2 = 0,43$ reduziert werden.
- 30

- In Figur 2 ist ein erster erfindungsgemäßer Empfänger für ein phasenmoduliertes optisches Signal S dargestellt. Einem optischen Resonator FPR wird das phasenmodulierte optische Signal S eingespeist. An einem optisch-elektrischen Wandler OEW1 zur Ermittlung einer Phasenänderung des phasenmodulierten optischen Signals S aus an dem optischen Resonator FPR reflektiertem Licht RL ist eine optische Auskoppereinrichtung OU dem optischen Resonator FPR vorgeschaltet.
- Optional kann ein zweiter optisch-elektrischer Wandler OEW2 als z. B. eine Photodiode dem optischen Resonator FPR nachgeschaltet werden, um durch eine Differenzbildung des Signales bzw. eine Mittelung des Rauschens am ersten optisch-elektrischen Wandler OEW1 die Empfindlichkeit zu steigern.
- Für ein frequenzmoduliertes Signal mit einem definierten Frequenzhub kann man theoretisch beide folgende Fälle unterscheiden: bei einem Empfänger mit Frequenzmodulation, wobei der Frequenzhub kleiner als die Bandbreite des optischen Resonators FPR ist, kann die Frequenzmodulation in ähnlicher Weise wie die Phasenmodulation betrachtet werden; bei einem Empfänger mit Frequenzmodulation, wobei der Frequenzhub größer als die Bandbreite des optischen Resonators FPR ist, wird der optische Resonator FPR als frequenzselektiver Spiegel wirken, d. h. eine Frequenz wird durchgelassen, wenn sie mit der Resonanzfrequenz des optischen Resonators FPR übereinstimmt und die andere wird reflektiert. Auf beiden Photodioden OEW1, OEW2 würden zwei komplementäre Binärsignale zur Detektion eines Frequenzsprunges im ursprünglichem frequenzmodulierten Signals aufgenommen werden. In beiden Fällen eignet sich der erfindungsgemäße Empfänger gut.
- Der optische Resonator FPR ist hier ein herkömmlicher Fabry-Perot-Resonator. Die optische Auskoppereinrichtung OU weist einen Zirkulator ZIRK auf, der dem optischen Resonator FPR vorgeschaltet ist und dessen Ausgang an dem optisch-elektrischen Wandler OEW1 angeschlossen ist.

In Figur 3 ist ein zweiter erfindungsgemäßer Empfänger gemäß Figur 2 dargestellt, wobei eine andere Art von optischer Auskoppereinrichtung OU verwendet ist. Die optische Auskoppereinrichtung OU weist einen Polarisationsstrahlteiler PST mit einer nachgeschalteten Polarisationsplatte PP auf, so dass das phasenmodulierte optische Signal S und das reflektierte Licht RL zur Ermittlung eines Phasenwechsels unterschiedliche durch den Polarisationsstrahlteiler trennbare Polarisationen aufweisen.

10

Weitere Varianten von optischen Auskoppereinrichtungen OU sind realisierbar. Wichtig ist die Rückgewinnung des reflektierten Lichtes RL am Eingang des optischen Resonators FPR, das die Information eines Phasenwechsels des phasenmodulierten Signals S liefert. Andere Lichtanteile müssen unterdrückt werden.

15

Patentansprüche

1. Empfänger für ein winkelmoduliertes optisches Signal (S),
dadurch gekennzeichnet,
5 dass einem optischen Resonator (FPR) das winkelmodulierte optische Signal (S) eingespeist wird,
dass dem optischen Resonator (FPR) eine optische Auskoppel-
einrichtung (OU) für ein vom optischen Resonator (FPR) re-
flektiertes Licht (RL) vorgeschaltet ist.
10
2. Empfänger nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass der optischen Auskoppereinrichtung (OU) ein optisch-
elektrischer Wandler (OEW1) nachgeschaltet ist.
15
3. Empfänger nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass der optische Resonator (FPR) ein Fabry-Perot-Resonator
ist.
20
4. Empfänger nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
dadurch gekennzeichnet,
dass die optische Auskoppereinrichtung (OU) einen Zirkulator
(ZIRK) aufweist, der dem optischen Resonator (FPR) vorge-
25 schaltet ist und dessen Ausgang an dem optisch-elektrischen
Wandler (OEW1) angeschlossen ist.
5. Empfänger nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
dadurch gekennzeichnet,
30 dass die optische Auskoppereinrichtung (OU) einen Polarisati-
onsstrahlteiler (PST) mit einer nachgeschalteten Polarisati-
onsplatte (PP) aufweist, so dass das winkelmodulierte opti-
sche Signal (S) und das reflektierte Licht (RL) unterschied-
liche durch den Polarisationsstrahlteiler trennbare Polarisati-
35 tionen aufweisen.
6. Empfänger nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

12

dadurch gekennzeichnet,
dass zur Steigerung der Empfindlichkeit ein zweiter optisch-
elektrischer Wandler (OEW2) dem optischen Resonator (FPR)
nachgeschaltet ist.

5

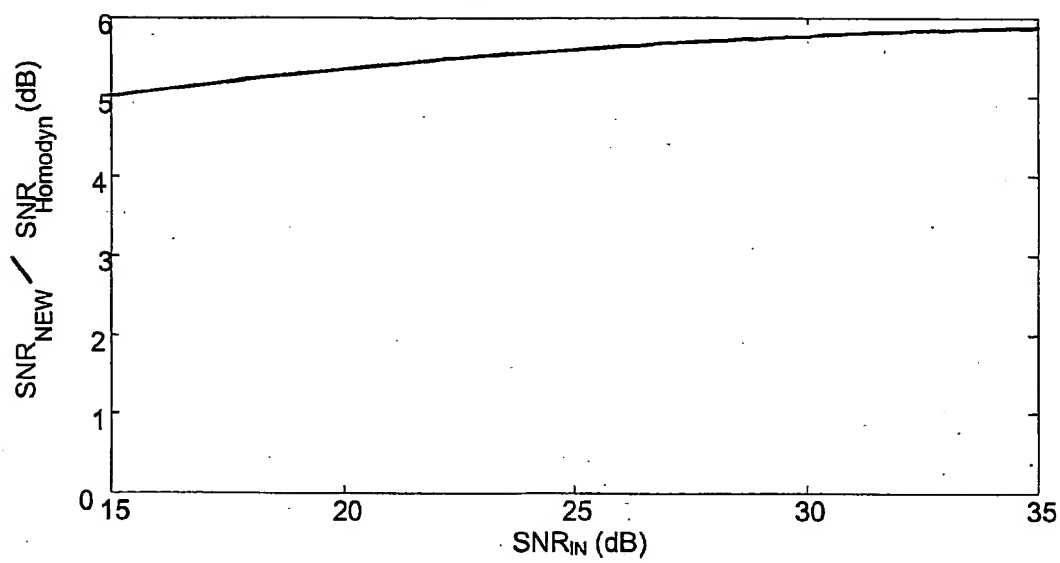
7. Empfänger nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass eine Kodierung einer Zuordnung der Phasenänderung mit-
tels des durch den optischen Resonator (FPR) reflektierten
und gegebenenfalls transmittierten Lichtes vorgesehen ist.

10

Zusammenfassung

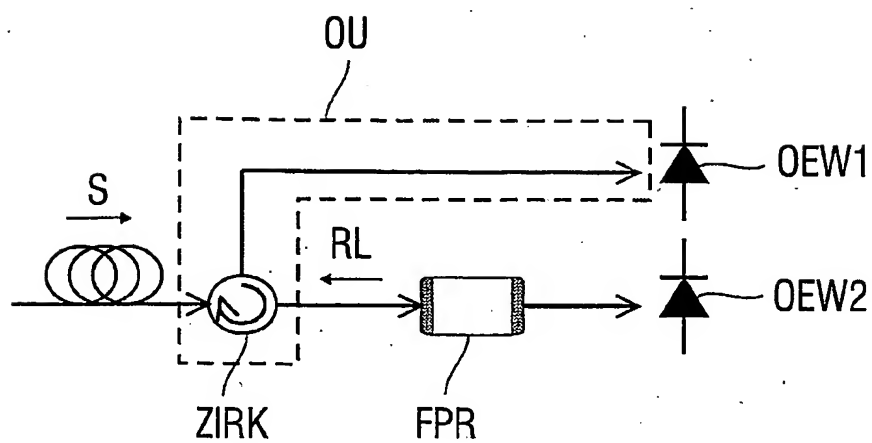
1/2

FIG 1



2/2

FIG 2



$\lambda/4$

FIG 3

